

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

**AUTOR:
FRANCISCO ANTONIO PABÓN PLAZA**

**DIRECTOR:
RAMÓN ENRIQUE PÉREZ PINEDA**

Quito, Octubre 2016

Francisco Antonio Pabón Plaza

**DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE
DISTRIBUCIÓN MEDIANTE LA TRANSFORMADA DE WAVELET**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2016

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Francisco Antonio Pabón Plaza

Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingenierías

Universidad Politécnica Salesiana

fpabon@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Ramón Enrique Pérez Pineda

Magister scientiarum en Ingeniería Eléctrica

Docente de la Universidad Politécnica Salesiana

Facultad de Ingenierías

rperezp@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

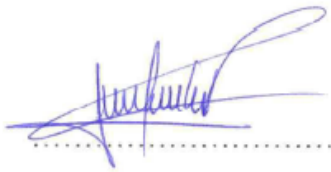
2016 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Ramón Enrique Pérez Pineda declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación “*Diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de distribución mediante la transformada de wavelet*” realizado por Francisco Antonio Pabón Plaza, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, Octubre 2016



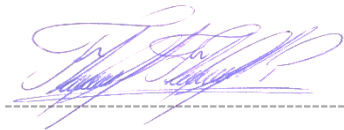
Ramón Enrique Pérez Pineda

Cédula de identidad: 0959948290

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Francisco Antonio Pabón Plaza, con documento de identificación N° 172178893 1, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: “Diagnóstico de fallas en sistemas eléctricos de distribución mediante la transformada de wavelet”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



Nombre: Francisco Pabón

Cédula: 172178893-1

Fecha: Octubre 2016

INDICE GENERAL

Introducción	2
Diagnóstico de fallas en el sistema eléctrico de distribución.....	4
2.1 Fallas en el sistema eléctrico de distribución.....	4
2.1.1) Fallas simétricas:	5
2.1.2) Fallas asimétricas:	5
2.2 Transformada Wavelet.....	5
2.2.1) Transformada Continúa de Wavelet (CWT):	6
2.2.2) Transformada Discreta de Wavelet (DWT):	6
2.2.3) Análisis Multi-Resolución MRA:	6
Formulación del problema.	7
3.1 Método de localización de fallas.....	7
3.2 Método de clasificación de fallas.....	7
3.3 Pseudocódigo de la aplicación de la WT para el diagnóstico de falla.	8
3.3.1) Algoritmo 1: Identificación.....	8
3.3.2) Algoritmo 2: Localización	8
Análisis de resultados.....	9
Conclusiones.	11
Referencias.....	12
Estado del Arte.....	15

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema Eléctrico de Distribución.	3
Figura 2. Sistema Eléctrico de Distribución IEEE 34 barras.	9
Figura 3. Señal monofásica del sistema IEEE 34 barras.....	9
Figura 4. Señal trifásica del sistema IEEE 34 barras.	9
Figura 5 (a). Señal de falla monofásica en la fase A del sistema IEEE 34 barras.	10
Figura 5 (b). Señal de falla bifásica AB del sistema IEEE 34 barras.....	10
Figura 5 (c). Señal de falla trifásica del sistema IEEE 34 barras.	10
Figura 6 (a). Señal de detalle wavelet para la fase A.	10
Figura 6 (b). Señal de detalle wavelet para la fase B.	10
Figura 7. Señal de detalle wavelet para el cálculo del tiempo de detalle.....	10
Figura 8. Señal de tendencia del error.....	11

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resultados del método de diagnóstico de fallas	11
Tabla 2. Matriz de estado del arte	15
Tabla 3. Resumen e Indicadores del estado del arte	18

Diagnóstico de Fallas en Sistemas Eléctricos de Distribución Mediante la Transformada de Wavelet.

Resumen

Este artículo presenta la posible aplicación de la transformada wavelet en sistemas eléctricos de distribución como herramienta de diagnóstico de fallas, aplicando las características de la Transformada Discreta de Wavelet (DWT) y el Análisis Multi-Resolución (MRA) para cada señal. El método debe ser capaz de detectar, localizar y clasificar los eventos, adquiriendo la información necesaria del comportamiento de todo el sistema, para lo cual es necesario el uso indispensable de una base de datos, la misma que debe contener la información de tensión y corriente, para el estado de falla y pre-falla del sistema simulado, con especial interés en el comportamiento de la señal de corriente. Para el diagnóstico de fallas es necesario la aplicación de dos algoritmos aplicados tanto para localizar como para clasificar los diversos tipos de fallas, mediante la información de los coeficientes de detalle wavelet, de la misma manera es fundamental conocer la velocidad de propagación de la onda, la cual para este análisis es calculada para cada tramo del sistema, medida desde la subestación de distribución. Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método propuesto en este artículo se lo ha realizado sobre el sistema de pruebas IEEE 34 barras diseñado en ATP, hallando la efectividad del método.

Palabras Clave: Clasificación de fallas, Coeficientes de detalle, Localización de fallas, Sistema eléctrico de distribución, Transformada Discreta de Wavelet, Velocidad de propagación de onda.

Abstract

This paper presents the possible application of Wavelet-transform in electrical distribution systems as a fault diagnostics tool applying the characteristics of the Discrete Wavelet Transform (DWT) and Multi-resolution (MRA) for each signal analysis. The method must be able to detect, locate and classify events, acquiring the necessary information on the behavior of the entire system, which is necessary for the essential use of a database, it must contain the voltage and current information, for state of failure and pre-failure simulated system with special interest in the behavior of the current signal. For fault diagnostics it is necessary the application of two algorithms applied both to locate and to classify the various types of faults, using information from the wavelet detail coefficients, in the same manner is essential to know the speed of wave propagation, which for this analysis is calculated for each segment of the system, measured from the distribution substation. The results obtained by applying the proposed method in this article have done on the system IEEE 34 bar tests designed in ATP, finding the effectiveness of the method.

Keywords: Classification of faults, Detail coefficients, Fault location, electrical distribution system, Discrete Wavelet Transform, Wave propagation speed.

Introducción

En este artículo se analiza la aplicación de la Transformada Wavelet (WT) por sus siglas en inglés, sobre el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), como herramienta de especial interés en el diagnóstico de fallas en el sistema de distribución [1]. El SEP está organizado en tres sistemas totalmente estructurados, como lo es la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica, donde el óptimo funcionamiento del sistema eléctrico implica la correcta operación de cada etapa [2], los grandes centros de generación son los responsables de producir la energía eléctrica necesaria para abastecer la demanda [3], el cual tiene como objetivo generar, transportar y abastecer la energía eléctrica hacia la carga del sistema o el usuario final [4], garantizando altos índices de confiabilidad y continuidad del suministro [5], el SEP como todo sistema puede ser vulnerable a diversos tipos de fallas [2], sobre todo en la distribución de la energía eléctrica, debido a que representa el sistema más complejo de todo el SEP [6], por lo que garantizar el correcto funcionamiento con índices de continuidad y confiabilidad es una labor de suma importancia y de gran dificultad [6].

El usuario se vincula al servicio eléctrico por medio del sistema de distribución, el mismo que al ser susceptible a fallas debido a la compleja topología de la red [6], falla del aislamiento de los equipos, descargas atmosféricas o por operaciones defectuosas accidentales [7] recaen en los índices de calidad de la energía, que depende de la cantidad anual de fallas y el tiempo de reconexión del servicio eléctrico [8]. El sistema es más susceptible a fallas sobre todo en las líneas de distribución que al ser sometidas a eventos de diferentes magnitudes pueden ocasionar transitorios de operación y

corrientes armónicas en las líneas [9], además de representar costos por energía no suministrada y desplazamiento del personal calificado para la reconexión [10], por lo que, el diagnóstico oportuno de las fallas proporcionara mayor velocidad de reconexión del servicio, disminución de costos, mantenimiento preventivo/correctivo de los equipos y mayor fiabilidad a la operación del sistema [11]. Las fallas más comunes en general se deben a descargas atmosféricas incidentes en las líneas de distribución, a su vez dichas fallas también pueden ser ocasionadas por diversos elementos que conforman al sector urbano de media y baja tensión [5], capaces de provocar cortocircuitos de diferentes magnitudes entre los diversos componentes del sistema [12], los mismo que son sometidos a esfuerzos eléctricos, debido a la presencia de corrientes de gran magnitud, ocasionando bajos índices de calidad de la energía, daño a los equipos y la interrupción del suministro a los consumidores [13]. El sistema de distribución debe ser capaz de despejar todo tipo de falla mediante la activación de diversos elementos de cierre o relés automáticos, que son los encargados de cortar el servicio con la finalidad de proteger todo el sistema [14], por lo tanto todo sistema eléctrico debe contar con esquemas de protección capaces de disminuir el tiempo de interrupción del servicio y daños al usuario ante la presencia de falla [15]. Debido a la gran cantidad de cortes de servicio provocados por dichos eventos el operador del sistema requiere herramientas que faciliten la localización y clasificación de las fallas, las mismas que deben identificar la zona de ocurrencia del evento y los componentes afectados de manera automática [16], además pueden determinar las zonas del sistemas críticas en seguridad, con lo que se

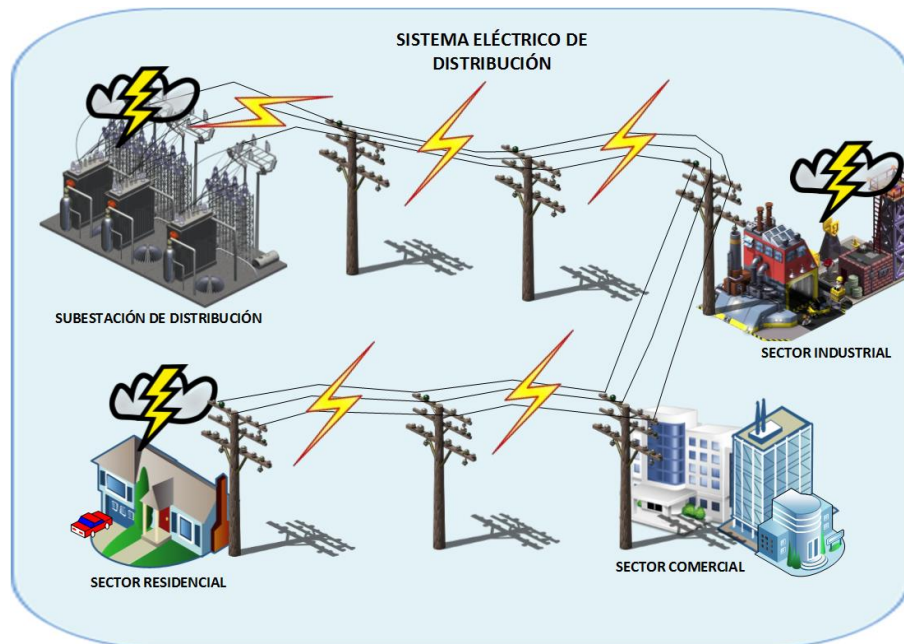


Figura 1. Sistema Eléctrico de Distribución.

puede estimar la confiabilidad y factibilidad de la operación del sistema mediante métodos de predicción de fallas [17]. Como ya se ha mencionado los dispositivos de protección aíslan al sistema de la falla, aunque la ubicación de la misma es desconocida [5], por lo que, el método a utilizar debe identificar el tipo de falla y su ubicación de forma instantánea permitiendo realizar la reparación del servicio en periodos de tiempo reducidos [28]. En un sistema tradicional el operador del sistema conoce la ocurrencia de falla mediante la información proporcionada por el usuario, siendo su ubicación exacta desconocida [13], la fiabilidad del suministro de energía en sistemas de distribución depende de la rápida localización del punto de falla, la cual al presentarse en un sistema radial con varios tipos de cargas laterales dificultan su ubicación [18] además los métodos que aplican las magnitudes de tensión y corriente de las líneas no pueden ser aplicados de la misma forma que en el sistema de transmisión [19]. Nuevas técnicas se han desarrollado con la finalidad de ser aplicadas al sistema de distribución

para el diagnóstico de fallas, una de ellas es la aplicación de la WT [15]. La aplicación de cualquier método de diagnóstico de fallas en distribución debe en primera instancia clasificar al tipo de falla identificando el tramo de la línea afectado para posteriormente ubicar el punto del evento [20], ejemplo básico de la estructura del sistema de distribución se muestra en la figura 1. Las variables necesarias para la aplicación del método de diagnóstico de fallas son los valores de frecuencia, tensión, corriente e impedancia que describa las características de funcionamiento de todos los elementos que conforman al sistema, esta información complementará la aplicación del método a utilizar identificando a su vez las características de la falla [16]. Al ocurrir una falla en las líneas de distribución el sistema presenta un incremento en sus componentes, generando señales a diferente frecuencia y magnitud en comparación con la componente fundamental, por lo que las magnitudes oscilan dentro de un ancho de banda de frecuencias [21], el diagnóstico de fallas consiste en el análisis de dichas frecuencias según la

velocidad de propagación de la onda de falla a lo largo de la línea, permitiendo determinar la distancia de falla desde la subestación de distribución [4]. La WT es una herramienta matemática aplicada al análisis de ondas viajeras en líneas de distribución, cuya aplicación principal es la extracción de la información de frecuencia, tiempo, corriente, y amplitud de las señales del sistema [22] mediante un proceso continuo de análisis necesario para el cálculo [23]. Existen varias herramientas matemáticas para el análisis de señales como lo es la Transformada de Fourier (FT) por sus siglas en inglés, que analiza las señales en el dominio de la frecuencia, la que presenta como principal desventaja en comparación con la WT la falta de información de la variación en el tiempo de la señal analizada [7], mientras que la WT permite un análisis de la señal en multi resolución (MRA) por sus siglas en inglés, en tiempo y frecuencia, es decir, el MRA permite analizar la señal de forma eficaz en diferentes bandas de frecuencia lo que hace de esta herramienta muy útil en el reconocimiento de patrones y en el diagnóstico de fallas en el SEP [1].

Diagnóstico de fallas en el sistema eléctrico de distribución.

Para diagnosticar fallas es necesario la implementación de modelos matemáticos desarrollados mediante la simulación de sistemas dinámicos capaces de emular el comportamiento tanto en operación como en falla [24], modelo que debe ser capaz de aplicar técnicas de procesamiento de señales de tensión o corriente, además de analizar las oscilaciones de estas magnitudes en diferentes bandas de frecuencia, las mismas que se producen ante la ocurrencia de un cortocircuito que afecta a una o varias partes del

sistema de distribución [6], generando un estado transitorio de funcionamiento, características necesarias para la implementación del método [20]. Uno de los modelos matemáticos más eficientes en la WT debido a que aplica filtro para identificar las señales de operación y falla [22], extrayendo información útil para el diagnóstico [25].

2.1 Fallas en el sistema eléctrico de distribución.

El SEP está vinculado con las centrales de generación, líneas de transmisión y el sistema de distribución, los cuales operan en conjunto como un solo sistema, en operación normal todos los elementos que conforman al SEP operan en paralelo a una frecuencia constante, cada etapa posee un sistema de protecciones establecido, por lo que no se puede asegurar que parte del SEP debe ser el que posee mayor protección, si la falla se da en cualquier puto del SEP este se verá afectado, sobre todo en el sistema de distribución por ser la etapa más compleja [26]. Las fallas que afectan al SEP son eventos que se han clasificado como aleatorios los cuales están ligados a una probabilidad de ocurrencia, afectan al correcto funcionamiento y distribución de la energía por la falla del aislamiento de los equipos o por descargas atmosféricas, las fallas que afectan al SEP se analizan mediante un estudio de probabilidad con la finalidad de estimar la vulnerabilidad del sistema eléctrico [27], por lo que conocer las características del evento pueden ayudar al operador del sistema a identificar la magnitud, lugar y elementos afectados [28], a su vez se puede estimar los índices de confiabilidad y la cantidad de energía no suministrada [29], esta información es crucial para la posteriores estrategias de planificación y operación del SEP en relación a la parte técnica como

económica [17]. Como ya se ha mencionado el SEP es más vulnerable a eventos de falla en las líneas de transmisión, debido a esta condición el método debe analizar las corrientes de falla como las magnitudes de mayor importancia para el diagnóstico de fallas, las que se catalogan por el número de fases afectadas por el evento, las fallas pueden ser monofásicas (LG) o línea a tierra, bifásica (LL) o doble línea, bifásica a tierra (2LG) y trifásica (3L) [30].

2.1.1) Fallas simétricas:

Las fallas simétricas causan el mayor daño al sistema debido a que generan flujos de corrientes de gran magnitud, se producen por cortocircuitos trifásicos que en su mayoría se deben a descargas atmosféricas, este tipo de falla está ligado a una baja probabilidad de ocurrencia donde se estima que el 5% de las fallas ocurridas son de tipo permanente, mientras que el 95% restante es categorizado como cortocircuitos momentáneos [6], [27].

2.1.2) Fallas asimétricas:

Las fallas asimétricas están relacionadas a una probabilidad de ocurrencia mayor, provocando condiciones desbalanceadas al sistema, son catalogadas como fallas que involucran una o dos fases, es decir, falla monofásica, bifásica y bifásica a tierra, el estudio parte de la descomposición de los fasores desequilibrados en componentes simétricas de secuencia cero, positiva y negativa, donde según la magnitud de la falla se puede obtener las características de tensión y corriente identificando de esta manera el tipo de falla [30].

2.2 Transformada Wavelet.

La WT es la herramienta eficaz para el diagnóstico de fallas en distribución, debido a que esta función matemática

es aplicada en el análisis de señales transitorias [11], las mismas que en general se presentan ante la ocurrencia de fallas, esta función tiene la capacidad de comprimir y descomponer las señales extrayendo todas las características de forma más detallada en diferentes instantes de tiempo y frecuencia [20], la función divide la señal original en dos componentes conocidas, aproximación y detalle, que son las variables en las que se almacena el contenido de la señal una vez aplicada la función, para la aplicación de la WT es necesario definir una señal de referencia o señal madre que permita definir la amplitud y la incidencia de cada frecuencia [13]. La transformada de wavelet se define como:

$$W_{f(a,b)} = \int f(t) * \psi_{a,b}(t) dt \quad (1)$$

Donde se puede definir a $\psi_{a,b}(t)$ como la señal wavelet de origen o señal madre como:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

Donde a es el parámetro de escala el cual permite la dilatación y contracción de la señal y b representa la posición en el tiempo del desplazamiento de la señal [31]. Las wavelets $\psi_{a,b}(t)$ generadas de la misma función wavelet madre tienen diferente escala a y posición b , pero tienen todas la misma forma. Se utilizan siempre factores de escala $a > 0$. Las Wavelets son dilatadas cuando la escala $a > 1$, y son contraídas cuando $a < 1$. Así, cambiando el valor de a se cubren rangos diferentes de frecuencias. Valores grandes del parámetro a corresponden a frecuencias de menor rango, o una escala grande de $\psi_{a,b}(t)$. Valores pequeños de a corresponden a frecuencias de mayor rango o una escala muy pequeña de $\psi_{a,b}(t)$ [31],

la WT posee dos variaciones, la Transformada Continua de Wavelet (CWT) y la Transformada Discreta de Wavelet (DWT) por sus siglas en inglés, según la señal que se desea analizar.

2.2.1) Transformada Continúa de Wavelet (CWT):

La CWT aplicada en el análisis de señales tiene como principal característica el almacenar la información de la señal en forma de vector con energía finita, utilizando los valores reales de la función los que son analizados al doble de la velocidad en comparación con el análisis realizado por FT [26].

La transformada continua de wavelet se define como:

$$C(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int x(t) * \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

$$\psi(t) = \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (4)$$

Donde $\psi(t)$ es la señal wavelet madre, a es el factor de escala, b es el factor de traslación a lo largo del eje de tiempo [20].

2.2.2) Transformada Discreta de Wavelet (DWT):

La DWT es particularmente aplicada en el análisis de señales transitorias debido a que su aplicación está ligado a el comportamiento de dichas señales en el dominio del tiempo como de la frecuencia, por lo que el análisis representa precisión en diferentes bandas de frecuencia como de resolución, lo que la hacen una gran herramienta para el diagnóstico de fallas [20], la DWT aplica variables de aproximación y detalla para el análisis de cada señal lo que la diferencia de la Transformada Discreta de Fourier (DFT) por sus siglas en inglés, la que aplica de funciones trigonométricas para el análisis [1]. La aplicación de la

DWT implica menor tiempo de procesamiento de información además de presentar mayores características que la CWT donde la información que se genera es altamente redundante [19]. La transformada discreta de wavelet se define como:

$$C[m, n] = \frac{1}{\sqrt{2^m}} \sum_k f(k) * \psi(n) \quad (5)$$

$$\psi(n) = \psi\left(\frac{n-k2^m}{2^m}\right) \quad (6)$$

Donde $\psi(n)$ es la señal wavelet madre, $f(k)$ representa a la señal discreta siendo k el número de coeficiente de wavelet y m, n representa a las variables de tiempo y escala respectivamente.

2.2.3) Análisis Multi-Resolución MRA:

El MRA es el método de complemento de la función DWT aplicado en el análisis de frecuencias de diferente resolución debido a que su aplicación permite descomponer señales de tiempo discreto extrayendo las características con mayor resolución en alta frecuencia, por lo tanto el método para diagnosticar fallas en sistemas de distribución debe aplicar DWT y la descomposición de la señal por MRA [19]. DWT descompone la señal tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia a través de la traslación como de la dilatación, con la aplicación de filtros de tipo pasa alto y pasa bajo los que permiten obtener parámetros de detalle referentes a escalas pequeñas con alta frecuencia como de aproximación referentes a grandes escalas con bajas frecuencias [20], la aplicación de los filtros de señal dependen del rango de frecuencias, la elección de un filtro cambia la resolución y escala de la señal la cual se puede modificar mediante interpolación [19].

Por lo tanto la función discreta se define según los parámetros de aproximación y detalle como:

$$f(k) = \sum_j^l CD_j(k) + CA_l(k) \quad (7)$$

Donde CD_j son los parámetros de detalle a escala j mientras que CA_l son los parámetros de aproximación a escala j y l representa el nivel de descomposición de la señal [20].

Formulación del problema.

En este trabajo el método a utilizar para el diagnóstico de fallas en el sistema de distribución es la DWT, debido a las características ya antes mencionadas, para la aplicación de este método es necesario la creación o adquisición de una base de datos que describa el funcionamiento del sistema tanto en el estado de pre-falla, falla y post-falla, para la cual se aplicará el programa de análisis de transitorios (ATP), por sus siglas en inglés [13], la aplicación de dicho software tiene como propósito la simulación de todo tipo de fallas con sus respectivas características, las que serán adquiridas por el método de diagnóstico de forma sucesiva, generando 11 tipos de falla con un total de 10 valores diferentes de resistencia, cabe recalcar que la base de datos debe contener como variable fundamental la información del comportamiento de la señal de corriente para cada fase. El método pretende en primera instancia localizar el punto de falla para posteriormente clasificarla, dependiendo de su magnitud identificando los elementos afectados, cada señal de corriente se descompone aplicando el MRA, obteniendo las variables de detalle y aproximación con la aplicación del filtro daubechies “db-4”, a una frecuencia de muestreo de 3,2 KHz [6], [8], [32].

3.1 Método de localización de fallas.

El método de localización consiste en analizar la velocidad de propagación de onda de la señal de falla para cada tramo del circuito, velocidad que se estima desde la subestación de distribución hasta cada nodo del circuito [8], según las características propias de la línea como la frecuencia de muestra, a su vez es necesario determinar el tiempo de detalle de la señal, el cual se calcula mediante la diferencia entre los dos picos consecutivos al tiempo de falla, información que se obtiene de la señal de detalle wavelet [25], el método ha sido calculado con diferentes valores de resistencia para diferentes tipos de falla, obteniendo una ubicación estimada, el porcentaje de error se lo puede determinar mediante:

$$error(\%) = \frac{|d - d_{real}|}{L} * 100 \quad (8)$$

Donde d es la distancia estimada del método, d_{real} es la distancia real medida desde la subestación hasta el nodo de falla y L representa a la longitud total del sistema de distribución medida desde la subestación hasta el punto más lejano de todo el sistema [8].

La localización del punto de falla se obtiene mediante:

$$x = \frac{v * td}{2} \quad (9)$$

Donde x es la distancia de falla medida desde la subestación de distribución, v es la velocidad de propagación de onda y td es el tiempo de detalle wavelet de la señal [25].

3.2 Método de clasificación de fallas.

El método de clasificación consiste en determinar la energía de cada señal de

falla según el nivel de descomposición, con la información de detalle wavelet [5], para posteriormente calcular la variación de energía de cada fase [13], el método para su aplicación necesita de una variable de umbral la que se encarga de detectar y clasificar la señal como falla [20], dicha variable resulta de un exhaustivo análisis del comportamiento del sistema según el tipo de falla, método utilizado para la elaboración de reglas para el algoritmo [11].

El cálculo de la energía de la señal de corriente se define como:

$$E_{jk} = |D_j(k)|^2 \quad (10)$$

Donde D_j son los parámetros de detalle a escala j de la señal y k el número de coeficiente de wavelet.

El cálculo de la variación de energía de cada fase a escala j se define como:

$$\Delta E_{jk} = \sum_k E_{jk} \quad (11)$$

Donde ΔE_{jk} representa la variable a utilizar en el cálculo de la localización de falla.

3.3 Pseudocódigo de la aplicación de la WT para el diagnóstico de falla.

3.3.1) Algoritmo 1: Identificación.

Algoritmo para identificación de falla mediante DWT.

Paso 1:

Para todo: valor \in información de pre-falla, falla y Post-falla.
Crear o importar base de datos simulados.

Paso 2:

Para todo: señal de corriente \in a la señal de falla del sistema.
Aplicar DWT para la descomposición en los coeficientes de aproximación y detalle.

Paso 3:

Para todo: señal \in al coeficiente de detalle.
Calcular:
1. La energía de la señal de corriente de cada fase, aplicar ecuación 10.

2. La variación de la energía de cada señal para cada fase, aplicar ecuación 11.

Paso 4:

Para todo: variación de la energía de cada señal.
Definir parámetro de umbral para cada tipo de falla.

Paso 5:

Para todo: Tipo de falla
Si la variación de la energía de cada señal $>$ umbral.
Aplicar condiciones de falla.

Paso 6:

- Condiciones de falla:
- A. Fallas con conexión a tierra.
 1. Monofásica.
Si y solo: Una de las fases presenta mayor variación de energía.
Identificar la fase.
Si la variación de la energía de la señal de fase identificada $>$ umbral de fase.
Falla monofásica.
 2. Bifásica a tierra.
Si y solo: Dos de las fases presenta mayor variación de energía.
Identificar las fases.
Si la variación de la energía de la señales de fase identificadas $>$ umbral de fase.
Falla bifásica a tierra.
 3. Trifásica a tierra.
Si la variación de la energía de las tres fases $>$ umbral de fase.
Falla trifásica a tierra.
 - B. Fallas sin conexión a tierra.
 1. Bifásica.
Si y solo: Dos de las fases presenta mayor variación de energía.
Identificar las fases.
Si la variación de la energía de la señales de fase identificadas $>$ umbral de fase.
Falla bifásica.
 2. Trifásica.
Si la variación de la energía de las tres fases $>$ umbral de fase.
Falla trifásica.

Paso 8:

Señales de falla clasificadas.
Culminar procedimiento, ir a paso 1 nuevo análisis.

3.3.2) Algoritmo 2: Localización

Algoritmo para localización de falla mediante DWT.

Paso 1:

Para todo: valor \in información de pre-falla, falla y Post-falla.

Crear o importar base de datos simulados.

Paso 2:

Para toda: señal de corriente \in a la señal de falla del sistema.
Aplicar DWT para la descomposición en los coeficientes de aproximación y detalle.

Paso 3:

Para toda: señal \in al coeficiente de detalle.
Calcular el tiempo de detalle (td) entre los dos picos consecutivos después de la falla.

Paso 4:

Para todo: nodo \in al circuito de distribución.
Calcular la velocidad de propagación de onda desde la subestación.

Paso 5:

Para toda: señal de falla.
Estimar el punto de ubicación.
Aplicar la ecuación 8.

Paso 6:

Para toda: Ubicación del punto de falla.
Estimar el porcentaje de error.
Culminar procedimiento, ir a paso 1 nuevo análisis.

Análisis de resultados.

El sistema eléctrico de distribución simulado para la implementación del método de diagnóstico de fallas es el sistema IEEE 34 barras, mostrado en la figura 2, circuito ideal para la aplicación del método debido a que implementa todas las características de un sistema eléctrico de distribución.

El software ATP se ha requerido para el diseño del circuito, con la aplicación adicional de un elemento que simule la ocurrencia de falla, el cual tiene establecido el tiempo de activación, el sistema se simulará sucesivamente para cada tipo de falla creando la base de datos necesaria para la implementación del método, la cual tiene un tiempo de compilación estimado de 3 horas, la información con la que se ha diseñado el sistema son los parámetros propios del circuito. Los datos primordiales que debe contener la base de datos es la del comportamiento de las corrientes del circuito, generadas en estado de pre-falla y falla, las cuales para el estado de pre-falla se las puede apreciar en la

figura 3 y figura 4, las que representan el estado de funcionamiento del sistema tanto de la señal monofásica como la trifásica, señales adquiridas de la simulación en ATP.

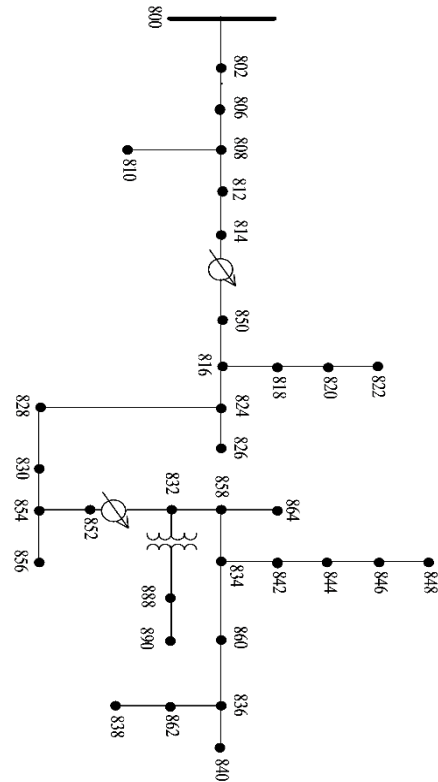


Figura 2. Sistema Eléctrico de Distribución IEEE 34 barras.

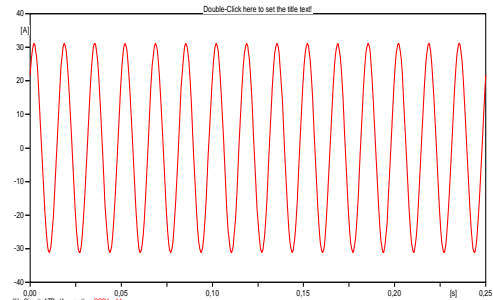


Figura 3. Señal monofásica del sistema IEEE 34 barras.

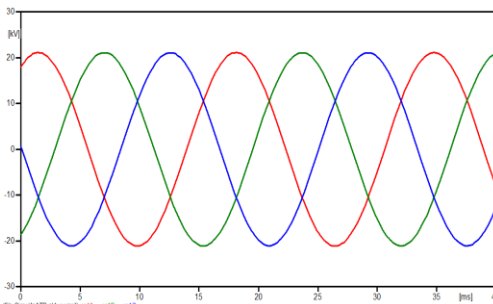


Figura 4. Señal trifásica del sistema IEEE 34 barras.

Como ya se ha mencionado el método permite simular fallas de diferente

magnitud que afectan a los elementos del sistema, con la finalidad de localizarla y clasificarla, de esta manera se puede analizar con más detalle el comportamiento del sistema ante la presencia de una falla, observando el comportamiento de la señal de corriente, la cual se pueden apreciar tanto para la falla monofásica, bifásica y trifásica en las figuras 5 (a), 5 (b) y 5 (c) respectivamente.

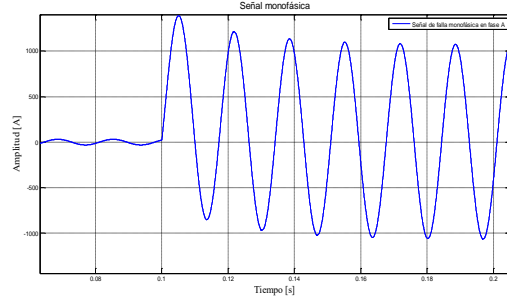


Figura 5 (a). Señal de falla monofásica en la fase A del sistema IEEE 34 barras.

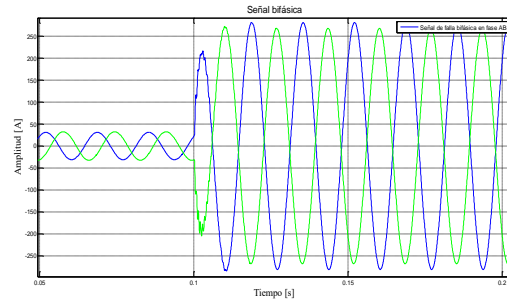


Figura 5 (b). Señal de falla bifásica AB del sistema IEEE 34 barras.

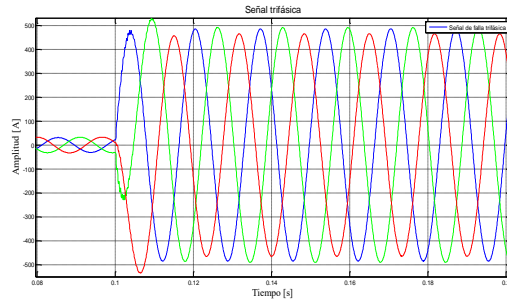


Figura 5 (c). Señal de falla trifásica del sistema IEEE 34 barras.

En la figura 5 se puede visualizar el incremento de la señal de corriente al presentarse una falla en el sistema, a su vez se identifica el tiempo en el que se origina dicho incremento.

Para la aplicación de los algoritmos de localización y clasificación de falla como ya se mencionó es necesario calcular los parámetros de detalle

wavelet de cada señal, dichas señales se obtienen para cada tipo de falla y para cada fase, como demostración la figura 6 (a) y 6 (b) muestran la señal de detalle wavelet para la fase A y fase B respectivamente.

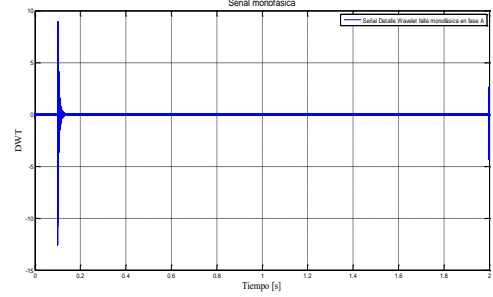


Figura 6 (a). Señal de detalle wavelet para la fase A.

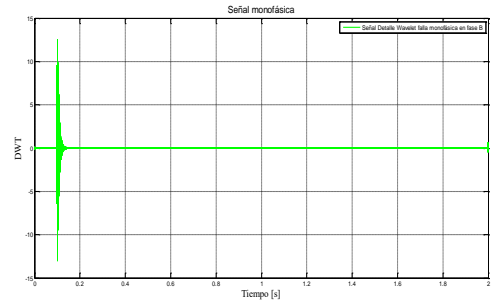


Figura 6 (b). Señal de detalle wavelet para la fase B.

Las señales de detalle para el resto de fallas y fases son similares como se demuestra en la figura 6 (a) y 6 (b) con la única diferencia de la variación en su amplitud debido a la cantidad de coeficientes calculados por el método, por esta razón no se ha colocado todas las gráficas de la señal de detalle. Una de las variables necesarias para la aplicación del algoritmo de localización de falla es el tiempo de detalle (td), el mismo que resulta de la diferencia entre los dos picos consecutivos al tiempo de falla resaltados en la figura 7, el cual a su vez se calcula para cada tipo de falla.

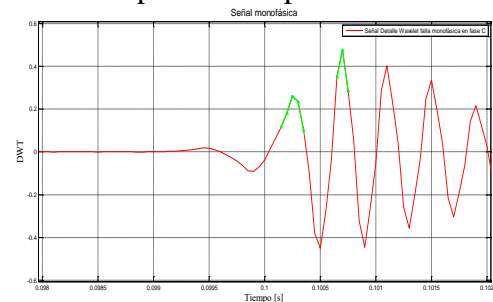


Figura 7. Señal de detalle wavelet para el cálculo del tiempo de detalle.

El valor de la variable (td) obtenido del análisis es similar para todo tipo de falla, debido a que la obtención del valor depende de la señal de detalle wavelet, por lo tanto, no se ha colocado todas las gráficas correspondiente a la cálculo de esta variable. El método de diagnóstico de fallas aplicando la WT después de una exhaustiva simulación y análisis de la información se ha determinado que el método ha diagnosticado 17 fallas en todo el sistema, calculando su ubicación estimada y el rango de error del método, los valores calculados se resumen en la tabla 1, la que describe la identificación de la falla, en nodo afectado y la longitud calculada.

Tabla 1: Resultados del método de diagnóstico de fallas

Monofásica					
Fase	Nodo	Long Real (Km)	Long Cal (Km)	TD (10E-04)	Error (%)
A	1	0,79	0,76	6	0,05
	5	22,57	21,67	6	1,53
	22	46,92	45,04	6	3,18
B	6	31,63	30,36	6	2,15
	9	34,84	33,45	6	2,36
	24	35,76	34,33	6	2,43
C	6	31,63	28,34	5,6	5,58
Bifásica					
Fase	Nodo	Long Real (Km)	Long Cal (Km)	TD (10E-04)	Error (%)
AB	15	54,21	52,04	6	3,68
BC	32	57,75	56,36	6,1	2,35
CA	16	55,98	53,74	6	3,80
	29	56,07	53,83	6	3,80
	32	57,75	55,44	6	3,92
Bifásica a tierra					
Fase	Nodo	Long Real (Km)	Long Cal (Km)	TD (10E-04)	Error (%)
AB	11	41,32	39,67	6	2,80
	15	54,21	52,04	6	3,68
BC	32	57,75	56,36	6,1	2,35
CA	10	35,09	33,69	6	2,38
Trifásica					
Fase	Nodo	Long Real (Km)	Long Cal (Km)	TD (10E-04)	Error (%)
ABC	6	31,63	29,69	5,87	3,29

El método de clasificación de falla aplicada al sistema IEEE 34 barras no

diagnostico la ocurrencia de falla trifásica a tierra en ningún punto del sistema, por lo que este tipo de falla se deduce tiene una probabilidad de ocurrencia muy baja en sistemas de distribución.

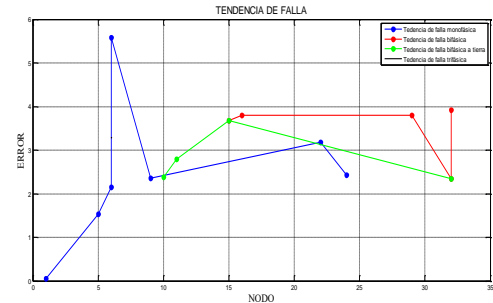


Figura 8. Señal de tendencia del error.

La figura 8 muestra la tendencia de error ya calculado que posee el método de diagnóstico, según el nodo y la fase afectada, para el caso de la falla trifásica no se aprecia en la gráfica debido a que el método solo diagnostico una sola falla de esta magnitud en todo el sistema.

Conclusiones.

El diagnóstico de fallas en el sistema eléctrico de distribución es un campo de investigación de gran interés, al ser el sistema más vulnerable a eventos que afectan el correcto funcionamiento tanto de manera técnica como económica, por lo que, el diagnóstico oportuno de dichos eventos representa mayor confiabilidad en la operación del sistema disminuyendo los índices de energía no suministrada y tiempo de interrupción servicio. Para el diagnóstico de fallas es necesario analizar las señales transitorias generadas tras el evento, para lo cual se puede aplicar varios modelos matemáticos capaces de analizar dicha señal, como lo es la DWT, es necesario mencionar que la aplicación de cualquier método de diagnóstico requiere de una base de datos que contenga toda la información del sistema tanto en operación como en

falla sin la cual el diagnóstico no podrá ser realizado por ningún método.

Referencias

- [1] L. Ye, D. You, X. Yin, K. Wang, and J. Wu, "An improved fault-location method for distribution system using wavelets and support vector regression," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 467–472, 2014.
- [2] X. Cui, G. Wang, X. Xu, and M. Ma, "Method of detecting and diagnosing faults in large power systems," *Conf. Proc. - 2012 16th Int. Symp. Electromagn. Launch Technol. EML 2012*, 2012.
- [3] J. Moshtagh and A. Rafinia, "A new approach to high impedance fault location in three-phase underground distribution system using combination of fuzzy logic & wavelet analysis," *11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, pp. 90–97, 2012.
- [4] A. Rafinia and J. Moshtagh, "A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 261–274, 2014.
- [5] D. Dwivedi, N. Singh, and S. Member, "A Wavelet Based Approach for Classification and Location of Faults in Distribution Systems," *Annu. IEEE India Conf.*, pp. 488–493, 2008.
- [6] B. Feizifar, M. R. Haghifam, S. Soleymani, and A. Jamilazari, "Fault location in combined overhead line and underground cable distribution networks using fault transient based mother wavelets," *12th Int. Conf. Environ. Electr. Eng.*, *EEEIC*, pp. 41–45, 2013.
- [7] D. Das, N. K. Singh, and A. K. Sinha, "A Comparison of Fourier Transform and Wavelet Transform Methods for Detection and Classification of Faults on Transmission Lines," *IEEE Power India Conf.*, pp. 620–626, 2006.
- [8] A. Borghetti, M. Bosetti, M. Di Silvestro, C. A. Nucci, and M. Paolone, "Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: Definition of mother wavelets inferred from fault originated transients," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 2, pp. 380–388, 2008.
- [9] A. Abdollahi and S. Seyedtabaai, "Comparison of fourier & wavelet transform methods for transmission line fault classification," *4th Int. Power Eng. Optim. Conf. Progr. Abstr.*, no. June, pp. 579–584, 2010.
- [10] S. U. N. Ming, W. Lei, and W. Zhi-gu, "Splitting and paralleling research of the Distribution system which contain distributed generation (DG) under the power system faults," pp. 2–5, 2008.
- [11] A. G. Shaik and R. R. V. Pulipaka, "A new wavelet based fault detection, classification and location in transmission lines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 64, pp. 35–40, Jan. 2015.
- [12] A. A. Yusuff, A. A. Jimoh, and J. L. Munda, "Fault location in transmission lines based on stationary wavelet transform, determinant function feature and support vector regression," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 110, pp. 73–83, May 2014.
- [13] S. Bhattacharya, "Fault detection on a ring-main type

- power system network using artificial neural network and wavelet entropy method,” pp. 1032–1037, 2015.
- [14] B. Vyas, B. Das, and R. P. Maheshwari, “An improved scheme for identifying fault zone in a series compensated transmission line using undecimated wavelet transform and Chebyshev Neural Network,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 760–768, Dec. 2014.
 - [15] R. V. R. De Carvalho, F. H. T. Vieira, S. G. De Araújo, and C. R. Lima, “A Protection Coordination Scheme for Smart Grid Based Distribution Systems Using Wavelet Based Fault Location and Communication Support,” *IEEE PES Conf. Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. (ISGT LA)*, 2013.
 - [16] Z. Gao, Q. Chen, and L. Shi, “Fault diagnosis of power system using relay protection setting values,” *10th IET Int. Conf. Dev. Power Syst. Prot. Manag. Chang.*, pp. P56–P56, 2010.
 - [17] D. R. R. Penido, L. R. de Araujo, and M. de Carvalho Filho, “An enhanced tool for fault analysis in multiphase electrical systems,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 75, pp. 215–225, 2016.
 - [18] J. Wu, D. You, L. Ye, and R. Huang, “Fault location in radial distribution systems using frequency slice wavelet transform,” *Power Eng. Autom. Conf.*, no. 2, pp. 1–4, 2012.
 - [19] A. H. . Bakar, M. S. Ali, C. Tan, H. Mokhlis, H. Arof, and H. a Illias, “High impedance fault location in 11 kV underground distribution systems using wavelet transforms,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 55, pp. 723–730, 2014.
 - [20] A. Tzoneva, “Fault Detection and Classification in a Distribution Network Integrated with Distributed Generators,” no. July, pp. 9–13, 2012.
 - [21] M. Wen, D. Chen, and X. Yin, “A novel fast distance relay for long transmission lines,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 681–686, Dec. 2014.
 - [22] S. P. Valsan and K. S. Swarup, “Wavelet transform based digital protection for transmission lines,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 31, no. 7–8, pp. 379–388, Sep. 2009.
 - [23] V. R. K. Bhupatiraju and R. R. V Pulipaka, “A wavelet based protection scheme for EHV asymmetrical teed circuits,” *Conf. Proc. IPEC*, pp. 384–389, 2010.
 - [24] Z. Jiang, S. Miao, H. Xu, P. Liu, and B. Zhang, “An effective fault location technique for transmission grids using phasor measurement units,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, no. 1, pp. 653–660, Nov. 2012.
 - [25] A. Abur and F. . Magnago, “Use of time delays between modal components in wavelet based fault location,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 22, no. 6, pp. 397–403, 2000.
 - [26] M. Goudarzi, B. Vahidi, R. a. Naghizadeh, and S. H. Hosseini, “Improved fault location algorithm for radial distribution systems with discrete and continuous wavelet analysis,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 423–430, 2015.
 - [27] A. dos Santos and M. T. C. de

- Barros, "Stochastic modeling of power system faults," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 126, pp. 29–37, 2015.
- [28] J. H. Zhao, Y. Xu, F. J. Luo, Z. Y. Dong, and Y. Y. Peng, "Power system fault diagnosis based on history driven differential evolution and stochastic time domain simulation," *Inf. Sci. (Ny)*, vol. 275, pp. 13–29, 2014.
- [29] M. Jamil, R. Singh, and S. K. Sharma, "Fault identification in electrical power distribution system using combined discrete wavelet transform and fuzzy logic," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, pp. 1–11, 2015.
- [30] M. Jamil, A. Kalam, A. Q. Ansari, and M. Rizwan, "Wavelet-FFNN Based Fault Location Estimation of a Transmission Line," vol. 1, no. July, pp. 77–82, 2013.
- [31] K. Harmanpreet and R. Kaur, "Speech compression and decompression using DWT and DCT," vol. 3, no. August, pp. 1501–1503, 2012.
- [32] N. D. J. Moslemi, "Fault Location for Radial Distribution Systems Using Fault Generated High-Frequency Transients and Wavelet Analysis," *18th Int. Conf. Electr. Distrib.*, no. June, pp. 1–4, 2005.